



УДК 621.314.2

3.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПЛАВНОГО ПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY THYRISTOR CONVERTERS AT THE SOFT START SYSTEMS HIGH-VOLTAGE ELECTRIC DRIVES

Ткачук Андрей Александрович, канд. техн. наук, главный конструктор по высоковольтной преобразовательной технике ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», Россия, 620137, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 1-Д. E-mail: tkachuk@asc-ural.ru, Тел.: +7(373) 360-05-01.

Andrey A. Tkachuk, Ph. D. in Technical Sciences, Chief designer for MV converter equipment CJSC «Automated Systems and Complexes», Russia, 620137, Ekaterinburg, Studencheskaya street, 1-D. E-mail: tkachuk@asc-ural.ru, Ph.: +7(373) 360-05-01.

Аннотация: В докладе приведены расчётные показатели качества электроэнергии на секциях шин распределительной подстанции в тот момент, когда подстанция питает асинхронный двигатель через тиристорный преобразователь напряжения в режиме плавного пуска.

Abstract: The report provides estimates of the quality of electricity on the bus sections of the distribution substation at a time, when the substation feeds the induction motor using thyristor converter in the soft start mode.

Ключевые слова: качество электроэнергии; высоковольтный тиристорный преобразователь; асинхронный двигатель; плавный пуск.

Key words: the quality of electricity; high-voltage thyristor converter; asynchronous motor; soft start.

В настоящее время на различных промышленных предприятиях, энергетике, нефте- и газодобывающей отраслях для запуска электродвигателей переменного тока широко применяются прямой и реакторный способы пуска. Основным их достоинством является простота и относительная дешевизна. Однако, в плане электромагнитной совместимости с системой электроснабжения (ЭС), особенно при пуске высоковольтных электродвигателей большой мощности, данные способы пуска не удовлетворяют современным требованиям. В момент пуска существенно ухудшаются показатели качества электроэнергии, что отрицательно сказывается на работе, как собственно системы электроснабжения, так и электроприёмников. Мощности двигателей соизмеримы с мощностью питающих подстанций, и они значительно снижают качество напряжения в системе электроснабжения из-за большого пускового тока, который в несколько раз превышает номинальный. При пуске двигателей происходит глубокая посадка напряжения на шинах распределительной подстанции, которая может привести к сбоям в работе других потребителей и срабатыванию секционной защиты [1-4].

Для уменьшения негативного влияния на сеть в качестве устройства плавного пуска асинхронных и синхронных двигателей с номинальным напряжением 3, 6 и 10 кВ всё более широко применяются тиристорные высоковольтные преобразователи напряжения (ТПН). Высокие технико-экономические показатели получают при плавном пуске мощных электроприводов механизмов центробежного принципа действия: насосов, вентиляторов, компрессоров [6].

Типовая схема электроснабжения асинхронных электроприводов центробежных механизмов с системой группового плавного пуска на базе преобразователя типа ПАД-В-Г разработки и серийного производства ЗАО «АСК» приведена в [3]. В качестве примера для оценки возможности применения ТПН для плавного пуска типового асинхронного двигателя (АД) мощностью 2,1 МВт в реальной системе электроснабжения приводятся расчёты провала напряжения на секционных шинах. Такие двигатели часто используются для привода центробежных насосов, дымососов и турбокомпрессоров. Именно провалы напряжения порождают большинство проблем в сетях и являются ключевым показателем качества электроэнергии. Все расчёты производятся с применением упрощённых инженерных методов и

формул [5]. На практике этого вполне достаточно, и что очень важно, простота значительно повышает воспринимаемость расчётов и доверие к полученным значениям широким кругом специалистов. Эквивалентная расчётная схема приведена на рис. 1.

Рассчитаем минимальный ток статора АД, необходимый для преодоления момента трогания механизма и плавного разгона. Для расчёта в табл. 1 приведены необходимые паспортные данные на электродвигатель и механизм.

Таблица 1.
Паспортные данные АД и механизма

| | | |
|------------------------------|----------------------|-------|
| Напряжение статора | $U_{1ном}, В$ | 10000 |
| Ток статора | $I_{1ном}, А$ | 139 |
| Электромагнитный момент | $M_{1ном}, Н·м$ | 20145 |
| Статический момент механизма | $M_{2ном}, Н·м$ | 17931 |
| Пусковой ток двигателя | $I_{1пуск}/I_{1ном}$ | 6,7 |
| Пусковой момент двигателя | $M_{1пуск}/M_{1ном}$ | 0,8 |
| Момент трогания механизма | $M_{2тр}/M_{2ном}$ | 0,15 |

Как известно электромагнитный момент двигателя пропорционален напряжению статора

$$M_{эм} \sim U_1^2 \text{ или } \sqrt{M_{эм}} \sim U_1. \quad (1)$$

Коэффициент снижения напряжения статора двигателя можно вычислить, используя соотношение

$$\sqrt{\frac{0,15 \cdot M_{2ном}}{0,8 \cdot M_{1ном}}} = \frac{U_{1мин}}{U_{1ном}}; \quad (2)$$

где $U_{1мин}$ – минимальное напряжение на статоре, обеспечивающее запуск двигателя.

Подставляя номинальные параметры из таблицы 1 в формулу (2) получим

$$0,41 \cdot U_{1ном} = U_{1мин}. \quad (3)$$

Таким образом, для обеспечения трогания механизма и плавного разгона можно снизить питающее напряжение до 41 % от номинала. Соответственно, пропорционально уменьшиться и кратность пускового тока, которая составит

$$6,7 \cdot I_{1ном} \times 0,41 = 2,75 \cdot I_{1ном}. \quad (4)$$

Однако для гарантированного запуска механизма при посадках сетевого напряжения необходимо пусковой ток увеличить на 5%. При этом минимальный ток, гарантирующий пуск данного механизма составит 29 % номинального.

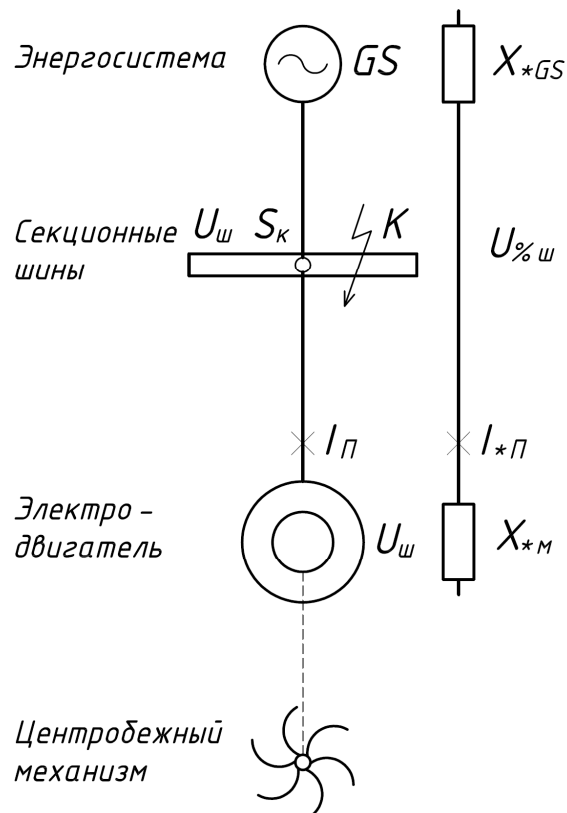


Рис. 1. Эквивалентная расчётная схема системы ЭС – АД – ЦМ.

Расчёт остающегося напряжения будем производить без учёта кабельных линий идущих к двигателю, влияния соседней нагрузки и конденсаторных батарей на секционных шинах [5]. Путём организационных мероприятий можно добиться наилучшего режима пуска двигателя. Исходные данные энергосистемы для этого режима следующие: ток короткого замыкания на шинах 10 кВ $I_{шкз} = 6,52$ кА при напряжении $U_{шном} = 10$ кВ; кратность пускового тока $K_{п} = 2,9$.

Расчёт производится в относительных единицах. Для этого принимаем базовую мощность $S_B = 1000$ МВА. При этом относительное индуктивное сопротивление системы

$$x_{*GS} = S_B / S_{скз}. \quad (5)$$

Полная мощность короткого замыкания энергосистемы

$$S_{скз} = \sqrt{3} \cdot U_{шном} \cdot I_{шкз} = 112,93 \text{ МВА}. \quad (6)$$

Подставим полученное в (6) значение в формулу (5) рассчитаем относительное индуктивное сопротивление энергосистемы. Оно равно 8,86. Относительное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя при плавном пуске можно вычислить по формуле

$$U_{\%Шнос} = U_B - U_{\%Ш} = 5,8 \%. \quad (11)$$

Представляет интерес рассчитать коэффициенты гармонических составляющих напряжения на шинах подстанции. Однако такие расчёты не могут быть выполнены простыми формулами. Для этого используется математическая модель АД с

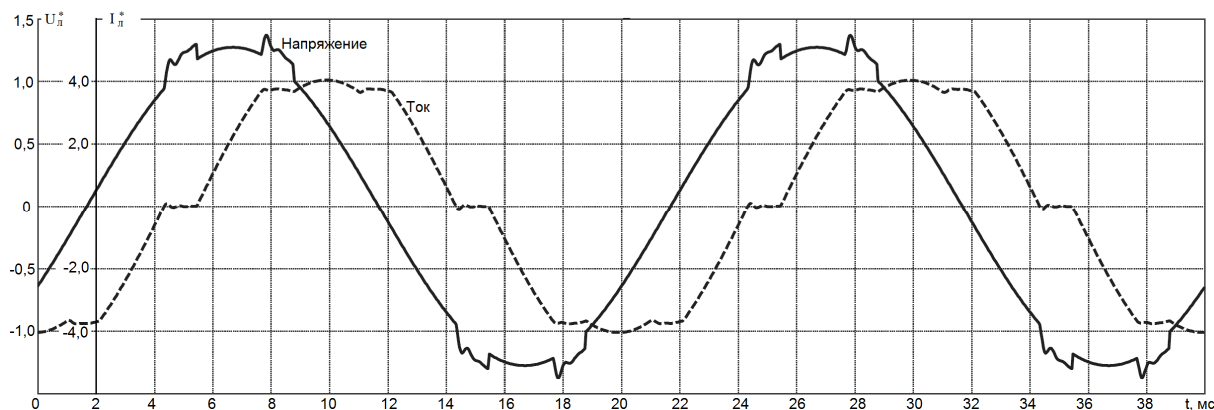


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на секционных шинах и тока статора АД

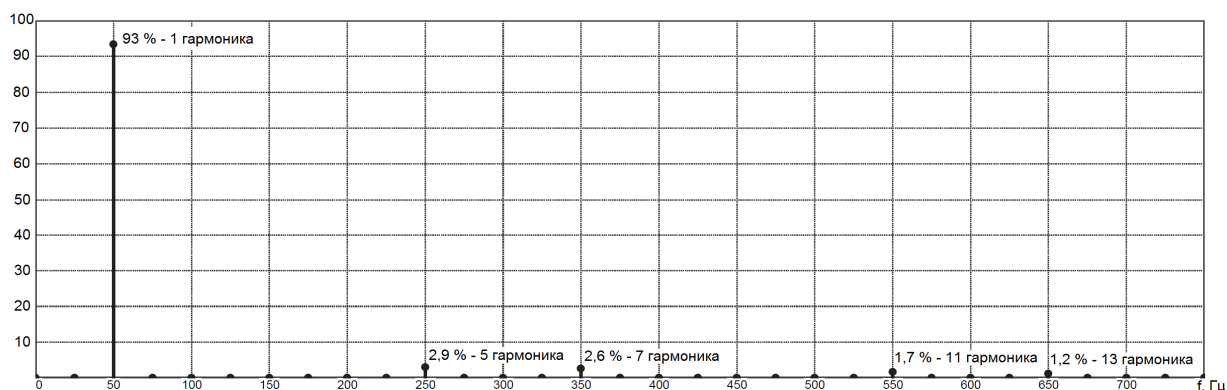


Рис. 3. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения на секционных шинах

$$x_{*M} = \frac{S_B}{K_{\Pi} \cdot S_{АД}}. \quad (7)$$

Полная мощность асинхронного двигателя

$$S_{АД} = \sqrt{3} \cdot U_{1ном} \cdot I_{1ном} = 2,407 \text{ МВА}. \quad (8)$$

Подставив в выражение (7) коэффициент кратности пускового тока и полную мощность АД находим относительное индуктивное сопротивление двигателя. Оно равно 143,26. Примем базовое напряжение за 100 %. При этом относительное значение тока в системе при плавном пуске двигателя

$$I_{*\Pi} = \frac{U_B}{x_{*GS} + x_{*M}} = 0,66. \quad (9)$$

Остающееся относительное напряжение на секционных шинах

$$U_{\%Ш} = I_{*\Pi} \cdot x_{*M} = 94,2 \%. \quad (10)$$

Провал напряжения на секционных шинах определяется простым соотношением

параметрами Т-образной схемы замещения. На практике получить требуемые параметры АД не всегда возможно. Но если они есть, то расчёты выполняются с использованием компьютерного моделирования. На рис. 2 приведены осциллограммы в относительных единицах мгновенных значений линейного напряжения на шинах подстанции и тока одной из фаз двигателя для наиболее тяжёлого режима. При этом ток уже достиг своего максимального значения, а вал двигателя только тронулся. Скольжение ещё равно единице. На рис. 3 приведены значения коэффициентов для 1,5,7,11 и 13 гармонических составляющих напряжения на секционных шинах. Как видно, гармоники кратные 3 отсутствуют в связи с их полным подавлением в схеме соединения – звезда. Все рассчитанные показатели качества электроэнергии сведены в таблицу 2. По мере разгона двигателя форма тока улучшается, а искажения напряжения уменьшаются.

Таблица 2.
Сравнение показателей качества электроэнергии

| Показатель качества | Расчёт-ный | Допустимый по ГОСТ 13109-97 |
|--|------------|-----------------------------|
| Глубина провала напряжения | 5,8 % | 10 % |
| Искажение синусоидальности кривой напряжения | 7 % | 8 % |
| 5-я гармоническая составляющая | 2,9 % | 4 % |
| 7-я гармоническая составляющая | 2,6 % | 3 % |
| 11-я гармоническая составляющая | 1,7 % | 2 % |
| 13-я гармоническая составляющая | 1,2 % | 2 % |

Анализ таблицы 2 показывает, что основные показатели качества, на которые наиболее значительное воздействие оказывает система ТПН – АД в режиме пуска, не выходят за рамки допустимых значений ГОСТ [7]. Можно сделать вывод, что при кратности пускового тока 3-4 номинала и отношении мощности короткого замыкания энергосистемы к полной мощности двигателя не менее 40, тиристорный преобразователь напряжения не оказывает существенного влияния на питающую сеть. Дополнительных мер, улучшающих электромагнитную совместимость при плавном пуске, применять нет необходимости. Однако провал напряжения можно снизить путём параллельного соединения шин секций и увеличением ёмкости конденсаторных батарей компенсатора реактивной мощности, если конечно таковой имеется, на момент запуска электродвигателя.

В настоящее время на предприятиях России и за рубежом ЗАО «АСК» реализовано несколько десятков проектов системы группового плавного пуска асинхронных и синхронных двигателей центробежных механизмов с использованием высоковольтного преобразователя на напряжение сети 3, 6 и 10 кВ и мощностью двигателя от 0,25 до 4 МВт [6,7]. Основными заказчиками являются: АК «Транснефть» - подпорные насосы нефтепровода ВСТО; ОАО «УГМК-холдинг» - турбокомпрессоры и глубинные насосы на шахтах; ОАО «ВСМПО-Ависма» - плунжерные насосы гидроаккумуляторной станции, Выксунский, Новолипецкий металлургические заводы и ряд других организаций. При обосновании целесообразности и возможности применения системы плавного пуска в

существующей или проектируемой системе электроснабжения многие заказчики требуют выполнения подобных расчётов, которые показывают удовлетворительную сходимость теоретических и практических результатов. Системы с ТПН в полной мере соответствуют предъявляемым требованиям и положительно зарекомендовали себя в эксплуатации. Во всех реализованных ЗАО «АСК» проектах провалы напряжения и гармонические составляющие на секционных шинах подстанции при плавном пуске находятся в допустимых ГОСТом пределах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ткачук А.А., Копырин В.С. Групповой плавный пуск высоковольтных синхронных электроприводов компрессорных станций // Электротехнический рынок. 2007. № 12. С. 22-24.
2. Высоковольтный тиристорный преобразователь напряжения для плавного пуска электродвигателя переменного тока / А.А. Ткачук, В.К. Кривовяз, В.Н. Яковлев, В.С. Копырин. Сб. науч. тр. 14-й международной НТК «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. С. 55-58.
3. Плавный пуск группы высоковольтных асинхронных электроприводов центробежных механизмов / А.А. Ткачук, В.К. Кривовяз, В.С. Копырин, А.Ю. Силуков. Силовая электроника. 2008. № 2. С. 16-19.
4. Ткачук А.А., Кривовяз В.К. Опыт разработки и внедрения преобразователей для плавного пуска высоковольтных электроприводов // Сб. науч. тр. 15-й международной НТК «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. С. 59-62.
5. Ткачук А.А. Улучшение электромагнитной совместимости мощных высоковольтных электроприводов переменного тока в пусковых режимах // Сб. докл. 2-й международной НПК в рамках выставки «Энергосбережение, отопление, вентиляция, водоснабжение в промышленности и ЖКХ» (15-17 мая 2012 г.). Екатеринбург: ЗАО «Уральские выставки», 2012. С.135-138.
6. Высоковольтные тиристорные преобразователи в системах плавного пуска электроприводов / А.А. Ткачук, А.Ю. Силуков, А.А. Шелгачев, В.В. Епифанов. Сб. науч. тр. 7-й международной (19-й всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск: изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 467-472.
7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.